

# 灌区干旱风险评估模型研究

王晓红, 乔云峰, 沈荣开, 尹正杰, 胡铁松

(武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 根据风险理论, 建立了包括农业干旱发生概率、抗旱能力、受灾体种植面积比等多因子的灌区农业干旱风险评估模型。并将相对产量作为灌区农业干旱评估指标, 能够反映土壤-作物-大气系统中水分运动对农业生产的影响, 利用该指标结合干旱风险评估模型对灌区农业干旱进行风险评估, 分析出灌区各种作物对干旱风险度影响最大的生育阶段和风险度最高的农作物, 以便灌区制定合理的抗旱方案以减小灌区干旱损失。

**关键词:** 灌区; 农业干旱; 干旱指标; 风险评估模型

**中图分类号:** P 426. 616      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2004)01-0077-05

目前, 有关学者对灌区干旱风险评估模型的研究已做了大量工作<sup>[1~4]</sup>, 但大多是对典型年的气候特征、影响范围、受灾程度进行分析, 分析所用的干旱指标考虑干旱对作物影响的较少。我国学者建立了许多农业干旱指标, 它们大多反映的是农田缺水状况。干旱对农业的影响, 不仅取决于大气降水异常的时间、强度, 而且也取决于作物本身以及土壤特性<sup>[5]</sup>。用水量平衡公式建立的干旱指标尽管考虑了降水、土壤水分等因素, 但对作物因素的考虑不够。为了更准确地评估干旱对农业生产的影响, 本文在这些研究基础之上选择能够反映土壤-作物-大气系统水分状况的干旱指标, 并对综合考虑干旱发生概率、灌区抗灾能力和受灾体种植面积比例等多种因素的灌区农业干旱风险评估模型加以研究, 为灌区实现高产稳产和减灾救灾提供科学依据。

## 1 干旱风险评估模型

风险评估主要是定量地分析处于风险中的系统特性, 阐明灾害的成因、估计灾害在规定时期内的发生概率以及研究受灾后造成的损失程度。农业干旱是一种气象灾害, 但是它对农业的影响不仅取决于气候条件, 还与农业生产本身以及社会经济特性等因素有关。因此, 本文在进行灌区干旱风险模型分析时建立了干旱发生概率、农作物减产损失、灌区抗灾性能和受灾体种植面积比例、风险评价等四个子模型, 对农业干旱进行综合分析和定量评估。干旱风险分析的模型框图如图1所示<sup>[2,3]</sup>。

### 1.1 干旱指标与农作物减产率模型

一个具有农业生产意义的干旱指标, 应当不仅反映水分亏缺程度, 而且能够体现水分亏缺对作物产量的影响, 从这一点出发, 根据水分不足所引起的产量下降程度来确定干旱指标。干旱对农业的影响表现为作物的正常生长发育受到影响并最终导致减产, 一般都采用水分生产函数来描述干旱对作物产量的影响程度, 本文选用 Jensen 推荐的分阶段水分生产函数连乘模型<sup>[6]</sup>来计算作物实际产量:

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{j=1}^n \left( \frac{ET_j}{ET_{mj}} \right)^j \quad (1)$$

式中  $n$  为生育阶段数;  $ET_j$  为第  $j$  生育阶段实际腾发量;  $ET_{mj}$  为最大腾发量;  $j$  为第  $j$  生育阶段作物水分敏感系数;  $Y$ 、 $Y_m$  为作物实际产量、作物最大产量。则作物全生育期减产率  $L$  为

收稿日期: 2002-10-28; 修订日期: 2003-01-30

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50239090)

作者简介: 王晓红(1974-), 女, 山西汾阳人, 武汉大学水利水电学院博士研究生, 主要从事土壤水与地下水资源研究。

E-mail: wangxiaoh1974@163.com

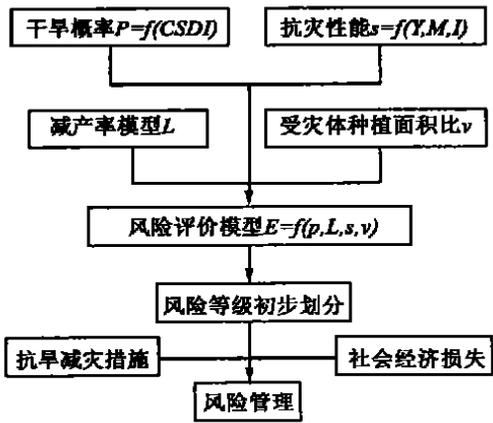


图 1 干旱风险评估系统模型

Fig.1 Model for drought risk appraising system

土壤水分状况有关。作物系数  $K_c$  可根据国内灌溉试验站推求的经验公式加以修正进行计算，土壤水分胁迫系数  $K_s$  可根据文献 [10] 所提供的适合稻田和旱地的土壤水分胁迫系数计算公式结合灌区田间实测土壤含水率资料进行确定。

由式 (1) 可知为了计算  $CSDI$ ，需要确定作物不同生育阶段的需水量、耗水量，以及作物不同生育阶段的缺水敏感系数、作物系数、土壤水分胁迫系数等参数，作物在任一生育阶段受到土壤水分胁迫，其最终产量都会受到相应的影响。农业部门将减产 10% 以上的种植面积称为受灾面积，减产 30% 以上的种植面积称为成灾面积，减产 80% 以上的种植面积称为绝收面积。本文根据不同减产率值来确定作物的干旱程度<sup>[11,12]</sup>，见表 1。

干旱对作物产量的影响主要表现在干旱程度以及该干旱程度的发生概率，将统计多年中不同等级干旱发生的情况进行排频，可求得不同干旱程度发生的概率  $P$ 。

### 1.2 灌区抗灾性能

农业干旱的发生与发展有着极其复杂的机理，它不可避免地受到各种自然的或人为因素的影响，气象条件、水文条件、农作物布局、作物品种及生长状况、耕作制度及耕作水平都可对农业干旱的发生与发展产生重要的影响。灌溉是防御和减轻干旱的主要措施，生产水平反映一个地区农业耕作科学合理的程度和抗御灾害的能力，管理水平体现灌区在耕作、栽培、病虫害处理以及水资源的存储与利用等方面的运作能力。故以保灌水平、生产水平与管理水平表示抗灾性能的高低。保灌水平  $I$  为保灌面积与种植面积的比值，生产水平以当地不同年代的平均产量  $Y$  与所在气候区最大产量  $Y_m$  之比表示。管理水平用  $M$  表示，一般管理好的灌区管理水平在 90% 以上，中等管理水平在 80% 以上，管理能力较差的为 60%。

### 1.3 受灾体种植面积比例

灌区的受灾体即作物，干旱造成的损失与灌区各作物的种植面积有关，作物种植比例越大，受灾体的密度越大，发生干旱时产量的损失也越大。本文以种植面积与耕地面积的百分比表示受灾体种植面积比例  $v$ 。

### 1.4 干旱风险评价模型

干旱风险评价模型为

$$E = f(P, L, s, v) \tag{4}$$

式中  $E$  为灌区干旱风险度，是上述 4 种模型的函数，即上述 4 种模型是干旱风险评价的影响因素。灌区某种作物干旱风险度的计算式为<sup>[1,3]</sup>

$$E = \prod_{i=1}^n (PL) (1 - I) (1 - \frac{\bar{Y}}{Y_m}) (1 - M) v \tag{5}$$

$$L = 1 - \frac{Y}{Y_m} = 1 - \prod_{j=1}^n \left( \frac{ET_j}{ET_{mj}} \right)^j \tag{2}$$

可使用减产程度来衡量干旱程度，将  $Y/Y_m$  值作为农业干旱指标  $CSDI = Y/Y_m$  (Crop Specific Drought Index)<sup>[7~9]</sup>， $CSDI$  反映的是由于缺水导致作物的减产程度， $CSDI$  值越小，则减产率越大，旱情越严重。

作物需水量  $ET_j$  (实际腾发强度) 的确定方法：当稻田积水层深  $H_i$  为  $H_{max} > H_i > 0$  时，水稻实际耗水量等于最大腾发量  $ET_m$ ；当  $H_i < 0$  时，水稻需水量由土壤供给，采用与旱作物同样的计算式

$$ET_j = K_{c_j} K_{s_j} ET_{0_j} \tag{3}$$

式中  $ET_{0_j}$  为第  $j$  生育阶段的潜在蒸散量，mm，可采用 1992 年联合国粮农组织推荐的改进 Penman-Monteith 公式计算； $K_{c_j}$  为某作物第  $j$  生育阶段的作物系数； $K_{s_j}$  是土壤水分胁迫系数，与土壤质地及

表 1 干旱程度等级

Table 1 Grades of drought degree

$CSDI$	>0.9	0.7~0.9	0.4~0.7	0.2~0.4	<0.2
程度	不旱	轻旱	中旱	重旱	特大旱

式中， $E$  为无量纲数，用 0~100 来表示 ( $E$  值越大表示风险度越大，即造成的可能损失越大。全灌区所有农作物的风险度为各种作物风险度的总和)； $P_i$  为某一干旱程度发生的概率； $L$  为减产率； $n$  为干旱等级数； $I$  为保灌水平； $M$  为管理水平； $v$  为某作物的种植面积比。

## 2 应用实例

### 2.1 灌区概况

孝感市徐家河灌区位于湖北省的易旱地区，灌区大部分为山丘区，地下水资源较为贫乏，灌区地下水可供开采量为 0.325 亿  $m^3/a$ ，仅用于农村人畜饮水的分散开采。年平均蒸发量 927~1100 mm，年平均降水量 1101.7 mm，枯水年降水量不足 600 mm。降水的特点一是年际变化大，最大年降水量为 1519.9 mm，最小年降水量为 595.4 mm，丰枯年份点雨量相差 3 倍左右；二是年内分配不均，6~9 月降水量占全年降水量的 73% 以上，其中 7 月份降水量最大平均为 193.8 mm，占全年降水量的 17.6%。降水不均的自然现象造成灌区旱灾的易发性。20 世纪 90 年代以来，随着上游地区和本地用水量的逐年增加，区域缺水现象日益明显，旱灾已在多种自然灾害中占主要位置。

### 2.2 灌区干旱程度

徐家河灌区为湖北省主要产粮区之一，农作物主要以水稻和小麦为主，其次为棉花、油菜、芝麻等油料豆类作物。本文利用孝感市徐家河灌区种植制度、逐旬气象资料、土壤水分资料，计算了灌区 1984 - 2000 年不同农作物的  $CSDI$ ，计算结果见图 2。并进行排频计算求得不同干旱程度的发生概率  $P^{[12]}$ 。

从图 2 可看出，灌区在 1984 - 2000 年期间，小麦有 4 年发生了中旱，发生概率为 23.5%，其中 1987 年的年减产最大， $CSDI$  为 0.5354，有 10 年发生了轻旱；棉花有 4 年发生了中旱，发生概率为 23.5%，其中 1993 年减产最大， $CSDI$  为 0.638；早稻有 5 年发生了轻旱，1993 年减产最大， $CSDI$  为 0.821；中稻有 5 年发生了中旱，发生概率为 29.4%，其中 1993 年减产最大， $CSDI$  为 0.598，有 9 年发生了轻旱；晚稻有 1 年发生了中旱，发生概率为 5.56%，其中 1996 年减产最大， $CSDI$  为 0.6723，有 8 年发生了轻旱，发生概率在 47% 以上。

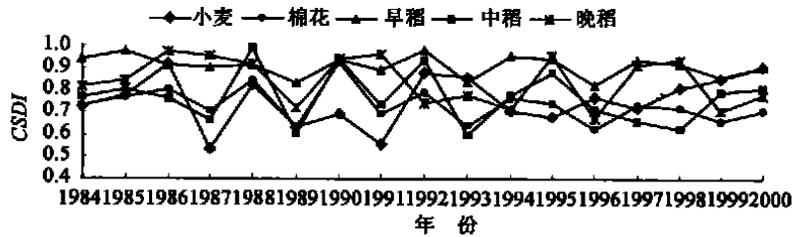


图 2 各农作物 17 年  $CSDI$  值  
Fig. 2  $CSDI$  values of crops of 17 years

### 2.3 灌区抗灾能力

徐家河灌区 1989 年前设计灌溉面积为 4.90 万  $hm^2$ ，1989 年以后为 3.87 万  $hm^2$ ，20 世纪 90 年代前灌溉率为 70%~85%，90 年代后，随着种植面积的减小以及管理水平的提高相应灌溉率提高为 75%~90%。可通过湖北省农作物产量资料查得多年平均产量与最大产量计算生产水平。该灌区近年来管理属中等水平，取 80%。

### 2.4 受灾体种植面积比例

灌区各受灾体种植面积比例  $v$  值，根据灌区灌溉制度的计算结果见表 2。

表 2 灌区作物种植制度

Table 2 Plant system of crops in irrigation region

作物种植制度	小麦	棉花	油菜	早稻	中稻	晚稻
种植面积/万 $hm^2$	0.883	0.224	0.784	0.359	1.014	0.458
$v$ / %	23.2	5.89	20.62	9.444	26.696	12.065
生育阶段	10.21~5.15	4.11~5.15	10.1~5.1	4.21~7.14	5.14~8.15	7.24~10.13

## 2.5 灌区干旱风险度计算

徐家河灌区各种农作物干旱风险度等级划分见表 3<sup>[2,3,9]</sup>。

根据上述求出的 4 个已知量, 计算出各种农作物的干旱风险度, 各农作物 17 年全生育期干旱风险度的平均值计算结果见表 4。

表 3 各农作物干旱风险度

作物	极重风险	重度风险	中等风险	轻度风险	无风险
小麦	>40	25~40	15~25	10~15	<10
棉花	>35	20~35	10~20	5~10	<5
早稻	>35	20~35	10~20	5~10	<5
中稻	>35	20~35	10~20	5~10	<5
晚稻	>35	20~35	10~20	5~10	<5

表 4 各农作物多年平均干旱风险度

作物	小麦	棉花	早稻	中稻	晚稻
风险度	13.56	7.58	4.91	21.71	9.82
风险等级	轻度风险	轻度风险	无风险	重度风险	轻度风险

## 2.6 灌区干旱风险度评估

(1) 作物不同生育阶段干旱风险度评估 各种农作物不同发育阶段对水分亏缺的敏感程度不同, 造成减产的程度也不同, 即使在相同的抗旱条件下, 不同生育阶段的水分亏缺对干旱风险度的影响差异也较大。根据文献[6], 敏感系数  $i$  可以通过灌溉实验确定, 由于徐家河灌区缺乏 Jensen 模型的  $i$  资料, 故参考邻近灌区的多年平均  $i$ 。表 5 为灌区农作物各生育阶段多年平均水分敏感系数。

从表 5 中可看出, 作物的不同生育阶段对水分亏缺的敏感程度是大不一样的, 敏感度高的生育阶段, 其干旱风险度也大。如小麦在进入拔节期后敏感系数骤然加大, 至抽穗期达到最大值, 因而在抗旱能力和受灾体种

表 5 作物各生长阶段水分敏感系数

作物	不同生育阶段及其敏感系数				
小麦	出苗期	分叶	拔节	抽穗开花	乳熟
	0.2406	0.0113	0.3035	0.3251	0.1195
棉花	出苗期	蕾期	开花结铃	花铃末期	
	0.1515	0.2131	0.4409	0.1945	
早稻	分蘖期	孕穗期	抽穗开花	乳熟期	
	0.2067	0.1102	0.5170	0.1161	
中稻	分蘖期	孕穗期	抽穗开花	乳熟期	
	0.0799	0.3343	0.5362	0.0496	
晚稻	分蘖期	孕穗期	抽穗开花	乳熟期	
	0.2181	0.4513	0.2604	0.0702	

植面积比例相同的条件下, 小麦在抽穗期缺水对减产率的影响最大, 对其干旱风险度值的影响也最大; 分叶期的敏感系数最小对减产率的影响也最小。同样, 灌区其它作物在其水分敏感系数大的生育阶段缺水对其干旱风险度的影响也最大。因此, 应根据不同作物的需水规律, 针对作物关键需水敏感期进行灌溉, 以减小作物的干旱风险度。

(2) 灌区各农作物全生育期的干旱风险度评估 据资料分析, 灌区出现干旱的天气气候背景主要有二类, 一是当年 4 月份降水量偏少, 7 月、8 月雨量也持续偏少, 导致年内 5 月末到 6 月中下旬和 9 月份发生干旱; 另一类是春季降水量正常, 但雨季结束后夏季持续高温, 雨量偏少, 导致年内发生夏秋旱。春旱主要影响小麦的产量, 夏、伏秋旱主要影响水稻和秋作物的产量。

灌区灌溉水平为中等时, 小麦与棉花发生中旱的概率相同, 但小麦的种植比例约为棉花的 4 倍, 因此小麦的干旱风险度比棉花大; 中稻的种植比例最大, 即受灾体种植面积比例最大, 同时中稻发生中旱的概率最大, 因而干旱风险度最大。晚稻的种植面积比例较小, 孕穗与抽穗期在 9 月份, 而灌区水库经过 6、7、8 月份丰水期的蓄水, 保灌水平相应提高, 因而干旱发生的概率低, 干旱风险度也相应降低。由表 4 及上述分析结果可以得出, 全灌区中稻的风险度最高, 其次小麦、棉花、晚稻为轻度风险作物, 小麦为轻度风险作物中风险最高的作物, 早稻为无风险作物, 因此灌区应根据评估结果调整种植结构使风险度大的作物的种植面积与灌溉条件相适应, 制定合理科学的灌溉制度, 调整全灌区的灌溉用水量, 适当加大中稻与小麦的灌溉量, 以减小两者的干旱风险度, 同时也降低全灌区的干旱风险度。

### 3 结 语

为了能定量地评价灌区的旱灾情况,在综合考虑了灌区气候条件、灌溉水平、生产管理水平和抗旱能力、受灾体种植面积等因素建立了干旱风险评估模型。本文利用相对产量作为灌区干旱评估指标,结合作物不同生育阶段水分对产量的影响,分析出灌区各种作物在某一生育阶段的最大干旱风险度,有助于灌区针对作物的关键需水期进行合理灌溉。对全灌区作物的干旱风险度的评估旨在找出风险度最高的农作物,以便灌区制定合理的灌溉制度以减小灌区干旱损失。文中所研究的干旱风险评估模型所考虑的影响因子还存在一些问题,该模型忽略或简化处理了一些影响因素对农业干旱的影响,如式(4)中的灌溉水平没有反映出不同作物对灌溉依赖程度的差异,在进行灌区农业干旱评估时产生了一定的误差,因此该模型尚待进一步改进。

#### 参考文献:

- [1] 任鲁川. 区域自然灾害风险分析研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 16(3): 242 - 246.
- [2] 牛叔超, 刘月辉, 王延贵. 气象灾害风险评估方法的探讨[J]. 山东气象, 1998(1): 15 - 18.
- [3] 王石立, 娄秀荣. 华北地区冬小麦干旱风险评估的初步研究[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(3): 64 - 68.
- [4] Petak W J, Atkisson A. Natural hazard risk assessment and public policy[M]. Springer-Verlag New York Inc, 1982. 62 - 122.
- [5] Sastri A S R A S. Agricultural Drought Management Strategies to Alleviate Impacts; Examples from the Arid and Subhumid Regions of the Indian Subcontinent[A]. In: Wilhite, D A. Drought Assessment, Management, and Planning[C]. Kluwer Academic Publishers, 1992. 31 - 48.
- [6] 沈荣开, 张瑜芳, 黄冠华. 作物水分生产函数与农田非充分灌溉研究述评[J]. 水科学进展, 1995, 6(3): 248 - 256.
- [7] 顾颖, 咎霞. 农业干旱模拟研究[J]. 水科学进展, 1993, 4(4): 253 - 259.
- [8] 袁国富, 吴连海. 京津冀平原地区一年两熟条件下农业干旱时空分析[J]. 中国农业气象, 2000, 21(2): 5 - 8.
- [9] Parry M L, Carter T R, Konijn N T. The Impacts of Climatic Variations on Agricultural, Volume 2: Assessments in Semiarid Regions, Kluwer Academic Publishers, 1988, 325 - 342.
- [10] 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999. 60 - 75.
- [11] Hammer G L, Muchow R C. Quantifying Climatic Risk to Sorghum in Australia's Semiarid Tropics and Subtropics Model Development and Simulation[A]. In: Muchow R C, Bellamy J A. Climatic Risk in Crop Production, CAB international[C]. 1991, 205 - 232.
- [12] FAO. Yield Responses to water[A]. Irrigation and Drainage Paper No 33[C]. Rome, 1979.

## Drought risk assessment model for irrigation region<sup>\*</sup>

WANG Xiao-hong, QIAO Yun-feng, SHEN Rong-kai, YIN Zheng-jie, HU Tie-song

(School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In this paper, based on the risk analysis theory, a risk assessment model for agricultural drought is developed, which includes the occurrence probability of drought, capacity of drought prevention, percentage of planting area, etc. The relative yield is introduced as the agricultural drought index reflecting the impaction of water transport in the SPAC system on the yield. By means of the index and the model, the agricultural drought risk of irrigation area is evaluated, which analyses the living phase of crops with the highest influence on risk degree of crops and the crop of the most risk degree. The results would greatly benefit to establish reasonable scheme of drought prevention and alleviate the disaster loss.

**Key words:** irrigation region; agricultural drought; drought index; risk assessment model

<sup>\*</sup> The project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50239090).